

Reinhard Pohl

Können Betriebsauslässe zur Hochwasserentlastung von Talsperren herangezogen werden?

Vorspann

Veränderte Randbedingungen erfordern modifizierte Betriebsregeln. Während die güteorientierte Bewirtschaftung von Stauräumen in der Vergangenheit hauptsächlich bei der langfristigen Bewirtschaftung eine Rolle spielte, gewinnt sie in jüngerer Zeit immer mehr auch bei der kurzfristigen Abflusssteuerung als Vorentlastung und während der Hochwasserereignisse an Bedeutung. Dabei soll vor allem die Entlastung aus Horizonten mit geringerer Wasserqualität ermöglicht werden. Gleichzeitig kann es notwendig werden, im Hochwasserfall insgesamt mehr vorzuentlasten und die Entnahmeeinrichtungen mit einzubeziehen. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit den diesbezüglichen Möglichkeiten bei Nutzung vorhandener Entnahmeeinrichtungen und den Anforderungen an bauliche Ergänzungen. Es werden Grundsätze für die Planung, die Berechnung, den Betrieb und die Überwachung sowie Beispiele aus hydraulischer Sicht besprochen.

Reinhard Pohl

Can Intakes be used for the flood control at reservoirs ?

Abstract

Changed constraints demand updated operation rules. In the past the focus of quality-oriented reservoir management was mainly directed to the long-term operation. Recently it has begun to play a more important role also with respect to the short-term operation, especially for the predischARGE just before upcoming floods. In this case the water should be released from low quality layers of the impounded water body. This paper considers the appropriate ways of using the existing intakes and outlets as well as the technical features for additional required works. Essential principles for the design, the operation and the monitoring are as well as examples discussed from the viewpoint of hydromechanics.

1 Einführung

Um es vorwegzunehmen, die in der Überschrift gestellte Frage kann mit „Ja“ beantwortet werden. Allerdings sind die Betriebsauslässe, die neben den Grundablässen zu den Entnahmeanlagen gehören, bei den meisten seinerzeitigen Planungen für andere Zwecke mit meist kleineren Durchflüssen vorgesehen worden. Hier ist vor allem die Wasserentnahme (z. B. für die Trinkwasseraufbereitung oder die Wasserkraftnutzung) zu nennen. Während die Heranziehung der Grundablässe für die Vor- und Parallelentlastung im Hochwasserfall üblich und unter bestimmten Randbedingungen zulässig ist [3], wird neuerdings auch verstärkt die Nutzung der Betriebsauslässe zur Steuerung der Hochwasserabgabe erwogen und untersucht. Dies bietet neben der möglichen höheren Abgabe auch die Möglichkeit der güteorientierten Bewirtschaftung, indem bei der Hochwasserentlastung gezielt Wasser geringerer Güte (z. B. eutrophiert, warm (Bild 1), trüb, verunreinigt) aus den entsprechenden Schichten an das Unterwasser abgegeben werden kann. Außerdem kann die für das Unterwasser ökologisch nachteilige Abgabe zu kalten Tiefenwassers im Sommer vermieden werden. Aus der Sicht der Bewirtschaftung nach der Menge kann im Hochwasserbemessungsfall 2 die Abgabeleistung der Betriebsauslässe (wenn sie in dieser Situation technisch zur Verfügung stehen) rechnerisch berücksichtigt werden [3]. Aus der Sicht der Bewirtschaftung nach der Güte ist natürlich die Benutzung der Betriebsauslässe, die häufig die Entnahme aus verschiedenen Horizonten gestatten, immer möglich.

2 Konstruktive Gestaltung von Betriebsauslässen

Die vorgesehene Nutzung bestimmt in der Regel die konstruktive Gestaltung der Betriebsauslässe. In der DIN 19700 Teil 11 [3] sind darüber hinaus verschiedene Anforderungen genannt: Schutz gegen Versatz, strömungsgünstige Ausbildung, Vermeidung von instabilen Strömungszuständen, Vermeidung von schädigender Kavitation bei Voll- und geplanter Teilöffnung der Verschlässe, zwei unabhängige Verschlässe und Revisionsverschlässe bei mittleren und großen Anlagen, ggf. Rohrbruchsicherungen. Bei einer güteorientierten Bewirtschaftung sind Entnahmen in verschiedenen Höhen vorzusehen, die auch mit den Grundablässen verbunden werden können.

Für die technische Ausführung von Betriebsauslässen sind zahlreiche Bauweisen angewendet worden, die die Entnahme aus verschiedenen Horizonten ermöglichen [9]. Dazu gehören

- frei stehende Türme im Stauraum (Nasstürme, die in unterschiedlichen Höhen vom Reservoir aus befüllt werden können, und Trockentürme, in denen das Wasser aus unterschiedlichen Höhen über Rohrleitungen entnommen wird)
- Pfeiler mit integrierten Entnahmeöffnungen
- Kombinierte Bauweisen (Komplexbauwerk, bei welchem ein Turm gleichzeitig als Schachtüberfall und Entnahmeturm dient oder bei dem Schachtüberfall und Entnahmeturm direkt hintereinander stehen und in denselben Stollen entwässern. Das Entnahmebauwerk kann auch an eine Stauwand direkt angebaut oder in diese integriert sein.)
- Zwischen- und Tiefenauslässe (zusätzlich zum Grundablass)
- Außen liegende Rohrleitungen (vertikale Rohre im Stauraum mit unterschiedlichen Einlaufhöhen, höhenverstellbares Teleskoprohr, schwenkbare Entnahmeleitung)

Zumindest bei den erstgenannten Beispielen haben die Wasserwege der Betriebsauslässe mehrere Abzweigungen, Umlenkungen und Armaturen. Insbesondere in den T-Stücken und auch Krümmern kommt es zu Strömungsablösungen, bei denen der eigentliche Fließquerschnitt nur noch weniger als die Hälfte des Rohrquerschnittes beträgt. Der restliche Teil des Rohrquerschnittes wird von den Ablösungswirbeln eingenommen, die mit einer 3-D-Strömungssimulation oder Messungen sichtbar gemacht werden können (Bild 2). Wenn sich die Strömung nach der Ablösung wieder über den vollen Rohrquerschnitt ausbreitet, ist dies mit einer Energieumwandlung verbunden, die durch den Borda-Verlust beschrieben werden kann.

Die Geschwindigkeitserhöhung in den eingegengten Fließquerschnitten führt bereits zu einer Absenkung des mittleren Strömungsdruckes. Zusätzlich bewirkt die Rotation in den Zentren der Ablösungswirbel eine weitere Verringerung des Druckes. Aus der Kavitationsforschung ist bekannt, dass bei einer Druckabsenkung unter den Dampfdruck bzw. unter den Wert Null des Absolutdruckes – also im Zugbereich – die Stabilität der im Wasser vorhandenen Keime (mikroskopisch kleine organische und anorganische Verunreinigungen mit Gaseinschlüssen) verloren geht und durch die plötzliche Vergrößerung der Gasblasen die gefürchtete Kavitation beginnt. Nach den Untersuchungen von Martin [5,6] beginnt dieser Prozess, wenn der Druck negativ wird (Zug). Bei einem Absolutwert von ca. -100 kPa (ca. -10 m WS absolut oder -20 m WS unter dem Normalluftdruck) und darunter liegt dann voll ausgebildete Kavitation vor, wie z. B. über die Stellverhältnisse von 0 bis 0,93 bei im Ringkolbenventil (RKV) in Bild 3 und von 0 bis 0,21 beim Schieber in Bild 4 [6]. Der Betrieb bei voller Öffnung wäre bei den beiden beispielhaft dargestellten Verschlussorganen theoretisch möglich, es müsste aber beim

Öffnen und Schließen ein Bereich mit schädigender Kavitation durchfahren werden. Durch die Anordnung der Armatur am Ende der Rohrleitung lässt sich das Betriebsverhalten verbessern. Dann ist auch das Steuerverhalten etwas günstiger, weil für den Durchfluss das Verhältnis der Ausflussflächen und nicht der örtliche Verlust wie bei Innenlage der Armatur und konstanter Ausflussfläche maßgebend ist.

Für die Anwendung dieser Zusammenhänge auf Großarmaturen des Wasserbaues müssen ihre geometrischen Abmessungen (Stellverhältnisse und Flächenverhältnisse) bekannt sein. Nur in diesem Fall können die Armaturen als Konstruktionselemente in die komplexe hydraulische Betrachtung der Entnahmeleitungen eingefügt werden.

3 Langfristige und ereignisbezogene Steuerung

Bei der Bewirtschaftung der Stauräume können die langfristige Bewirtschaftung im Normalbetrieb und die kurzfristige Bewirtschaftung im Hochwasserfall unterschieden werden. Die langfristige Bewirtschaftung zielt hauptsächlich darauf ab, für die unterschiedlichen Nutzungen genügend Wasser bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen und dabei auch die Verhältnisse im Unterwasser so zu steuern, dass sie den natürlichen Gegebenheiten unter ökologischem Aspekt möglichst nahe kommen. Mit der kurzfristigen Steuerung wird versucht, bei der Vorentlastung oder während des Hochwasserereignisses den Scheitelabfluss durch Rückhalt (Retention) zu reduzieren und die Schäden im Unterwasser zu minimieren. Ein Instrument hierfür ist die Entlastung unter Hinzuziehung der Betriebsauslässe, die, wie oben dargestellt, neben der Erhöhung des Durchflusses auch zur Beeinflussung der Wasserqualität im Stauraum dienen kann. Gleichwohl ist aus Sicht des Verfassers die Zuverlässigkeit und Langfristigkeit der Niederschlagsvorhersage momentan trotz umfangreicher Bemühungen in der Forschung mitunter noch nicht ausreichend, um eine wirksame Vorentlastung mit einer merklichen Scheitelreduktion zu erreichen und dabei eine verlustbringende Abgabe von Wasser sicher zu vermeiden.

Die langfristige Steuerung kann zumindest für einfache Speichersysteme bei stabilen Wetterlagen und Bedarfssituationen zweckmäßigerweise so erfolgen, dass der Abfluss aus dem mit einem Faktor versehenen Zufluss ermittelt wird. Dieser Faktor ist für Wasserstände unterhalb des Stauzieles kleiner als Eins, am Stauziel gleich Eins und oberhalb größer. Auf diese Weise wird vor allem versucht, das Stauziel zu halten und mit variablen Durchflüssen im Unterwasser günstige IHA-Parameter (Indices of hydrological Alteration) zu erreichen [4,11].

4 Anforderungen an die zur Entlastung benutzten Betriebsauslässe

Die erste Anforderung bezieht sich auf einen nennenswerten **Durchfluss** (verbunden mit entsprechend hohen Geschwindigkeiten), der im Hochwasserfall zu einer wirksamen Entlastung beitragen kann.

Mit einem Grundablassrohr DN 1000 kann bei einer Stauhöhe von beispielsweise 30 m und einem voll geöffneten Verschluss- bzw. Regelorgan ein Durchfluss in der Größenordnung von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und damit in 24 Stunden eine Abgabe von mehr als $800\,000 \text{ m}^3$ erreicht werden.

Die zu den Betriebsauslässen gehörenden Entnahmehrohrleitungen sind vielfach für die in der Wasserversorgung und -verteilung üblichen wirtschaftlichen Fließgeschwindigkeiten von zwei bis drei Meter pro Sekunde ausgelegt. Deshalb betragen die Entnahmen durch Rohrleitungen gleichen Durchmessers in der Regel nur etwa ein Viertel von denen, die sich mit den Grundablässen realisieren lassen. Um mit Hilfe der Betriebsauslässe eine nennenswerte Entlastung zu erreichen, stellt sich also die Frage, mit welcher Fließgeschwindigkeit die Entnahmehleitungen maximal beaufschlagt werden können. Mit steigender Geschwindigkeit sinkt bei konstanter Ortshöhe nach der Gleichung von *Bernoulli* der Druck. Als begrenzende Größe ist der Beginn schädigender Kavitation anzusehen, der bei modernen Armaturen vielfach mit -100 kPa Absolutdruck angesetzt wird.

Bei der einfachen Rohrleitungsberechnung wird meist mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit gerechnet und die Geschwindigkeitshöhenausgleichswerte werden im turbulenten Bereich näherungsweise zu Eins gesetzt. Genauso wird mit den Druckhöhenausgleichswerten verfahren, was bedeutet, dass die Stromlinienkrümmung meist nicht berücksichtigt wird.

Insbesondere bei Leitungsführungen mit häufigen Umlenkungen gibt es aber ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen mit Strömungsablösungen und strömungsunwirksamen Teilquerschnitten, wie durch Messungen und numerische 3-D-Simulationen (Bild 2) gezeigt werden kann. Da der Durchfluss durch den wirksamen Endquerschnitt der Entnahmehleitung bestimmt wird, steigen die lokalen Geschwindigkeiten über die mittlere Rohrgeschwindigkeit an (Bilder 3 und 4), was zu einem zusätzlichen Druckabfall führt. Wenn außerdem noch berücksichtigt wird, dass in Ablösungs- und Trennschichten Wirbel auftreten, in deren Kern eine noch weitere, häufig von schädigender **Kavitation** begleitete Druckabsenkung stattfindet, wird deutlich, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit allein keine ausreichende Aussage über die Kavitationsgefahr gestattet [5].

Wenn die Fließgeschwindigkeiten und damit die Durchflüsse über die ursprünglich geplanten Größen angehoben werden, ergeben sich auf Grund der Trägheit des ruhenden oder sich bewegenden Wasserkörpers auch höhere **Druckstöße** im Falle des schnellen Öffnens oder Schließens der Verschlussorgane in den Leitungen. Dies wird z. B. aus den Gleichungen für den Druckstoß in Rohrleitungen nach Budau oder Joukowski sichtbar, wo der Durchfluss jeweils im Zähler steht [1]. Höhere Durchflüsse ergeben nach dem Impulserhaltungssatz auch höhere Stützkraft an einem Kontrollvolumen. Für Strömungsum- oder -ablenkungen bedeutet dies, dass die **Krümmertreibkräfte**, die seitens des Bauwerkes durch Rohrlager, Halterungen oder Festpunkte aufgenommen werden müssen, größer werden.

Bei der gezielten Entnahme mit größeren Einlaufgeschwindigkeiten muss auch darauf geachtet werden, dass kein Wasser aus benachbarten Schichten ungewollt angesaugt wird, denn größere Geschwindigkeiten bedingen einen größeren **Schichtgrenzenabstand** zum Einlauf. Entsprechendes gilt für den **Lufteinzug** im Falle einer hoch liegenden Entnahmeöffnung (im Sommer warmes, nährstoffreiches Wasser aus dem Epilimnion). Beide Nachweise können numerisch durch Berechnung einer Mehrphasenströmung oder mit konventionellen Ansätzen geführt werden.

Ungeeignete Lagerungen oder Konstruktions- und Ausmündungsverhältnisse können bei den Regelarmaturen von Entnahmeleitungen bei bestimmten Stellverhältnissen **Schwingungserscheinungen** verursachen, die auch die anschließenden Rohrleitungen bzw. die Entnahmebauwerke beeinträchtigen, Rohrbefestigungen lockern und erhebliche Geräusche entwickeln können.

Schwingungsanalysen werden im Allgemeinen als Frequenzanalysen für die Armaturengehäuse, anschließende Rohre, andere relevante Bauteile sowie für den umgebenden Luftschall durchgeführt. Dabei werden die Schwingbeschleunigungen und gegebenenfalls auch die Schwinggeschwindigkeiten erfasst. Am aussagekräftigsten sind die Schwingungsparameter in Strömungsrichtung. Eine mittlere Schwinggeschwindigkeit von maximal 8 mm/s kann vielfach noch toleriert werden (s. a. DIN 4150-3).

Schwingungsspitzen in der Frequenz des Luftschalls, die nicht in der Analyse der Schwingungsparameter des Armaturengehäuses oder der Rohrleitung erscheinen, können auf Schwingungen des inneren Abschlusskörpers hindeuten. Bei einem Ringkolbenventil kann der Kolben mit der Schubkurbel und der Antriebswelle ein schwingungsfähiges System bilden, bei dem die Antriebswelle als Torsionsfeder und -dämpfer wirkt. Bei Drossel- und

Absperrklappen kann der Klappenteller durch die Impulse der Ablösungswirbel zu Schwingungen angeregt werden. Bei komplizierten Verhältnissen bietet es sich auch an, mit einem vereinfachten Ersatzsystem Eigenschwingungen zu ermitteln und die Resonanzbildung zu untersuchen.

5 Zuverlässigkeit von Verschlussorganen

Üblicherweise wird die Verfügbarkeit von Grundablässen im Hochwasserbemessungsfall 1 durch die (n-1)-Bedingung [2] berücksichtigt. Eigene Untersuchungen [6], [7] haben gezeigt, dass diese Regelung weit auf der sicheren Seite liegt, da die Nichtbedienbarkeitswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall bei Verschlüssen an Stauanlagen in der Größenordnung von 1 % (Bild 5) und bei Anlagen der Wasserversorgung, -verteilung, Abwasserableitung sowie -behandlung bei etwa 10 % liegt (Bild 6). Bei stochastischen Simulationen der Vorentlastung im Hochwasserfall unter Berücksichtigung von Menge und Güte könnte also ein Wert zwischen 1 % und 10 % angesetzt werden.

6 Beispiele

Einige im Rahmen von Begutachtungen der hydraulischen Verhältnisse von verschiedenen Entnahmeleitungen gemachten Erfahrungen sollen nachfolgend als Beispiele kurz dargestellt werden: Im ersten Fall befanden sich die Regelarmaturen (Ringkolbenventile) von Entnahmeleitungen in der Mitte der Rohrleitung. Auf der mehr als 20 m langen danach folgenden Rohrstrecke konnte sich der Wasserstrahl wieder an die Rohrwand anlegen, so dass der volle Endquerschnitt für die Berechnung maßgebend war. Zur Abflusssteuerung waren dabei kleine Öffnungsverhältnisse erforderlich, die wegen der sehr hohen Geschwindigkeiten zu sehr starker kavitationsbedingter Geräuschentwicklung und deutlichen Schwingungen führten. Die Armaturen konnten nicht genutzt werden, weil bereits das Durchfahren des Bereiches kleiner Öffnungen sehr problematisch war (vgl. Bild 3, Abschn. 4). Als Problemlösung kommt hier die Anordnung der Verschlüsse in Endlage mit Bau einer neuen Schieberkammer oder ein Höherlegen der Rohrleitungsausmündung zur Anhebung der Drucklinie im Armaturenbereich in Frage. Im zweiten Beispiel existierten Überlegungen, den Unterdruck im oberen Bereich der senkrechten Entnahmeleitung in einem Trockenturm durch Belüftung abzumildern. Es konnte gezeigt werden, dass dies dem Abreißen der Wassersäule nicht hätte entgegenwirken können und nur die Anhebung der Drucklinie durch Drosselung

mit einem Regelorgan am Ende der Rohrleitung die Betriebsfähigkeit garantieren kann. Allerdings führt diese Maßnahme zu einer Reduktion des Abflusses und schränkt damit den Erfolg der zusätzlichen Entlastung ein. Im dritten Fall waren Verbindungsleitungen von den senkrechten Entnahmerohren zum Ablaufstollen des Schachtüberfalls einer Talsperre angeordnet worden. Wegen der beengten Platzverhältnisse gab es mehrere 90°-Krümmer und ein Regelorgan (Ringkolbenventil) mehrere Meter vor der freien Rohrausmündung. Die kavitationsbedingten Schwingungen und Geräusche waren erheblich. Die Verlegung des Ringkolbenventils an das Rohrende, die Verminderung der Umlenkwinkel von Krümmern durch optimale Platzausnutzung und die Drehung von hinter Krümmern liegenden Absperrklappen um 90°, so dass ihre Verschlusskörper in Offenstellung symmetrisch angeströmt wurden, brachten den gewünschten Erfolg (Leistungssteigerung und Kavitationsminimierung).

In einem vierten Beispiel wurde die Versagenswahrscheinlichkeit einer zweisträngigen Entnahmeanlage bei Öffnen auf Anforderung (z.B. im Hochwasserfall) untersucht. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der jeweils in Reihe liegenden Einzelkomponenten (Rechen, Notverschluss, Rohr, Stopfbuchse, Regelorgan) waren aus vorhergehenden Untersuchungen bekannt oder geschätzt (Bild 5 und 6). Mit diesen Werten ergab sich ein gleichzeitiger Ausfall beider Leitungen durch Nichtöffnung ($Q = 0$) mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,1 ‰ (jede 10000. Anforderung) und für das Nichtöffnen nur eines der beiden parallelen Stränge von 2% (jede 50. Anforderung).

7 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass Betriebsauslässe zur Hochwasserentlastung an Talsperren unter den erläuterten Voraussetzungen eingesetzt werden können. Im Rahmen der Speicherbewirtschaftung nach Menge und Güte ist es vorteilhaft, zur Vor- und Parallelentlastung Wasser aus bestimmten Schichten des Staukörpers abzuleiten. Um nennenswerte Abgabeleistungen als Alternative oder Ergänzung zur Entlastung durch die Grundablässe zu erreichen, sind hydraulische Einzelfalluntersuchungen erforderlich, die in Abhängigkeit von der Bauart häufig zu Umbauanforderungen der Anlagen führen. Diese Anpassungen haben meist eine strömungsgünstigere Gestaltung, größere Durchmesser, die Aufnahme von größeren Umlenkkraften, Regelorgane am Ende der EntnahMLEITUNGEN und gegen Unterdrücke weniger empfindliche Armaturen zum Ziel.

Als vorteilhaft erwiesen haben sich ström ungünstig ausgebildete Wasserwege mit wenigen und geringen Richtungsänderungen der Strömung sowie Regelorgane am Ende der Leitungen, wie durch zahlreiche Berechnungen für verschiedene Anlagen und durch Schwingungsmessungen nachgewiesen werden konnte.

Wenn die Strömungsführung durch Umbauten nicht verbessert werden kann, muss der kavitationsarme Betrieb meist durch eine Drosselung des Durchflusses und damit eine Verringerung der Hochwasserentlastungswirkung erreicht werden.

Autor

Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl

Institut für Wasserbau und THM

TU Dresden

01062 Dresden

reinhard.pohl@tu-dresden.de

Literatur

- [1] Bollrich, G.: Technische Hydromechanik. 6. Aufl. Berlin, München: Verlag für Bauwesen, 2006.
- [2] Bornschein, Antje; Dittmann, Robert; Gilli, Stefano; Pohl, Reinhard:
Mehrzieloptimierung der Steuerung von Talsperren zur Minimierung von
Hochwasserschäden im Unterwasser.- In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilung
38/2009, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, ISSN
0949-5061, ISBN 978-3-86780-100-3
- [3] DIN 19700-11 Stauanlagen, Teil 11: Talsperren, Juli 2004.
- [4] Froehlich, F., Dittmann, R., Ostrowski, M., Pohl, R.: Optimierung von
Mehrzweckspeichern im Hinblick auf Hochwasserrisiko und Ökologie.- In:
Hydrologie und Wasserwirtschaft 53(2009)3, S. 146-153[5] Häusler, E.:
Einbeziehung von Entnahmearbeiten zur Hochwasserentlastung bei Talsperren. In:
Wasserwirtschaft 82 (1992), S. 618-624.
- [5] Martin, H.: Kavitation in Ablösungswirbeln. In: Wasser, Energie, Luft 88(1996), Heft
1/2.
- [6] Martin, H.; Pohl, R. (Hrsg.): Technische Hydromechanik - Band 4: Hydraulische und
numerische Modelle. 2. Aufl. Berlin, München: Verlag für Bauwesen, 2008.

- [7] Pohl, R.: Failure frequency of gates and valves at dams and weirs. In: Int. Journ. Hydropower & Dams (2000) S. 77-82.
- [8] Pohl, R.: Zuverlässigkeit von Verschlüssen in Wasserversorgungsanlagen und in der Abwassertechnik. In: KA 49 (2002), Nr. 11, S. 1545-1554.
- [9] Pohl, R., Martin, H.: Nutzung von Betriebsauslässen für die Hochwasserentlastung von Talsperren.- In: WasserWirtschaft 99(2009)1-2, S. 21-25, ISSN 0043 0978 D 10812
- [10] Pohl, R.; Bornschein, A.: A management system to optimize reservoir control in the case of floods. In: Ferreira, Alves, Leal & Cardoso: Proc. River Flow Conf. Lisboa 2006, Vol. 2, pp 2127-2135.
- [11] Dittmann, R.; Pohl, R.; Fröhlich, F. ; Ostrowski, M.: Optimizing the Operating Rules of Multipurpose Reservoirs During Extreme Floods Considering Technical, Economic and Ecological Aspects. In: Proc. 4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Toronto, Ontario, Canada, May 6-8, 2008.

Verzeichnis der Bildunterschriften

Bild 1 Jahresganglinien des Wasserstandes und der Temperaturschichtung in einem Stausee (oben Epilimnion, unten Hypolimnion, dazwischen Metalimnion (Sprungschicht sinkt im Laufe des Sommers ab, der Anteil des kühlen „guten“ Wassers wird geringer)

Bild 2 Strömungsverhältnisse in Krümmern und Abzweigen (ANSYS CFX) mit ungleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung und teildurchflossenen Querschnitten

Bild 3 Ringkolbenventil RKV DN 800 in der Rohrleitungsmitte: Mittlere Druckhöhe p_{s1h} im Endquerschnitt des RKV und lokale Druckhöhe p_{ih} in den Wirbelkernen (Luftdruck = Bezugsdruck)

Bild 4 Durchfluss und Drucklinien (ohne Berücksichtigung der lokalen Druckabsenkung in den Wirbelkernen) für verschiedene Stellverhältnisse eines Beispielschiebers in der Mitte (ausgezogene Linien) und am Ende (gestrichelte Linien) einer 100 m langen Rohrleitung DN 800 mit 20 m Druckunterschied (Luftdruck = Bezugsdruck)

Bild 5 Versagenshäufigkeiten bei ausgewählten Verschlüssen an Talsperren

Bild 6 Versagenshäufigkeit ausgewählter Verschlüsse an Anlagen der Wasserversorgung, -verteilung und Abwasserableitung sowie -behandlung.

Jahresganglinie der Temperaturschichtung

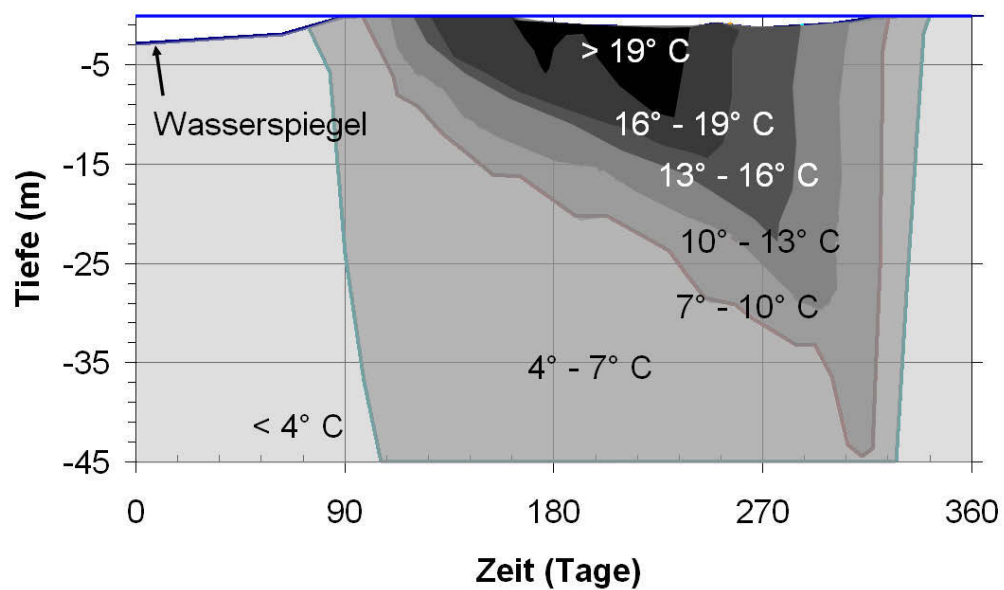


Bild 1

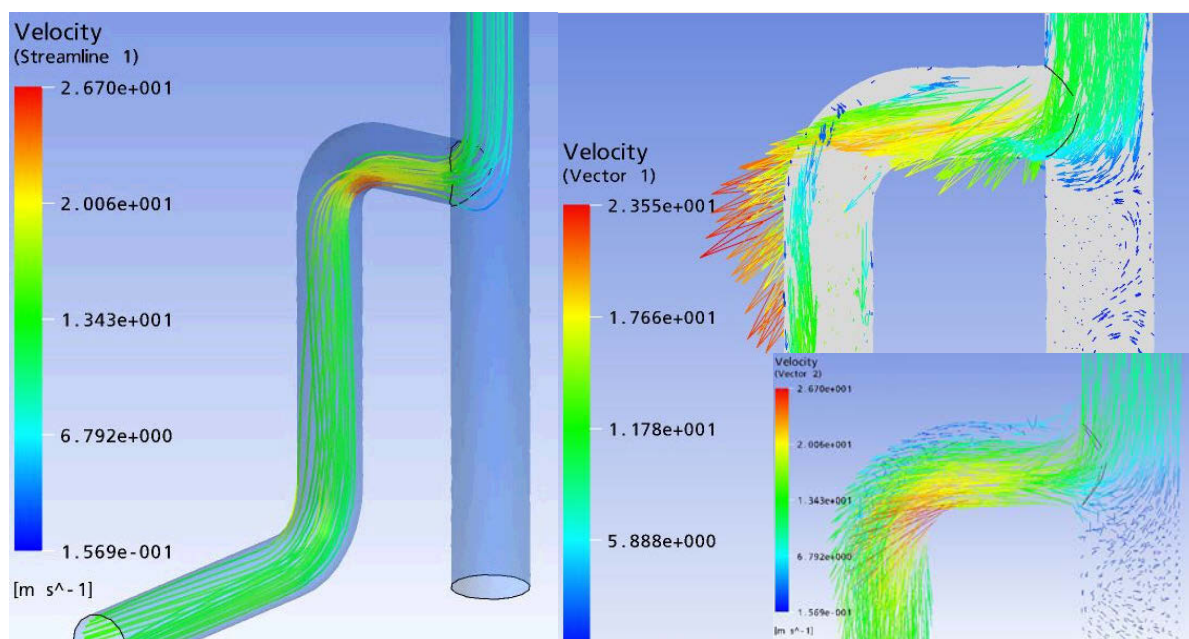


Bild 2

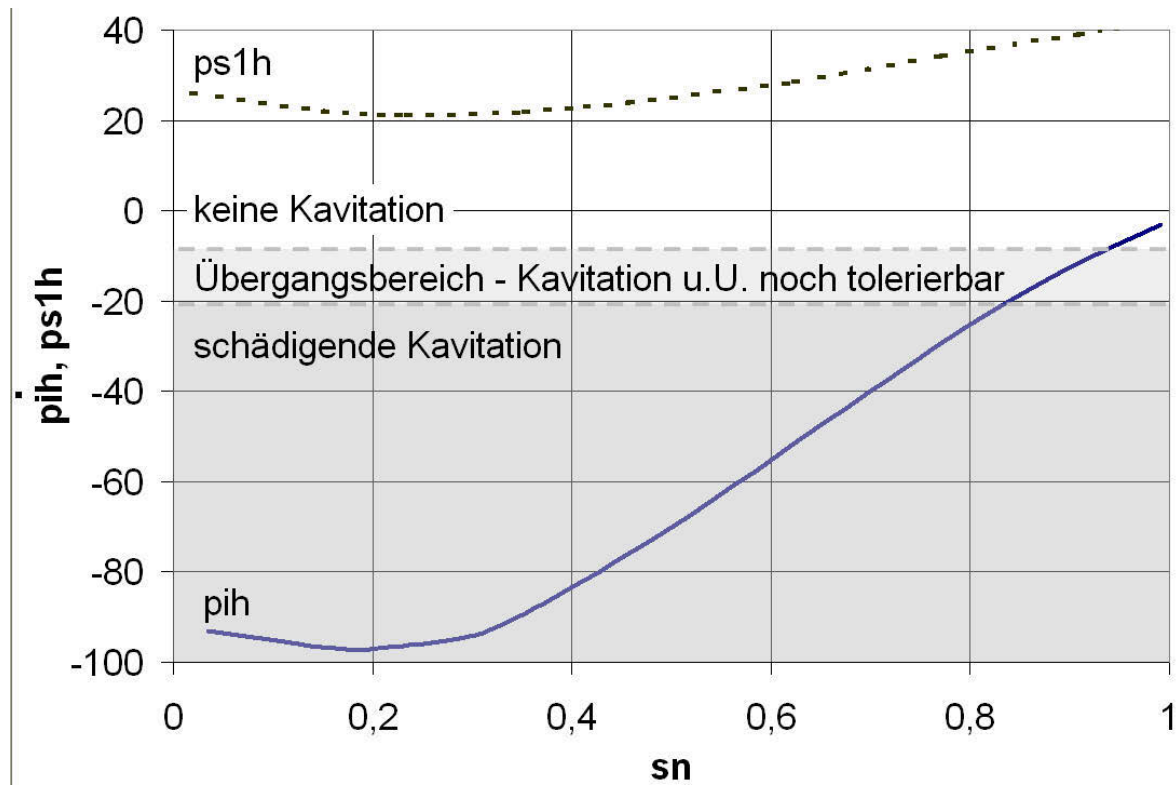


Bild 3

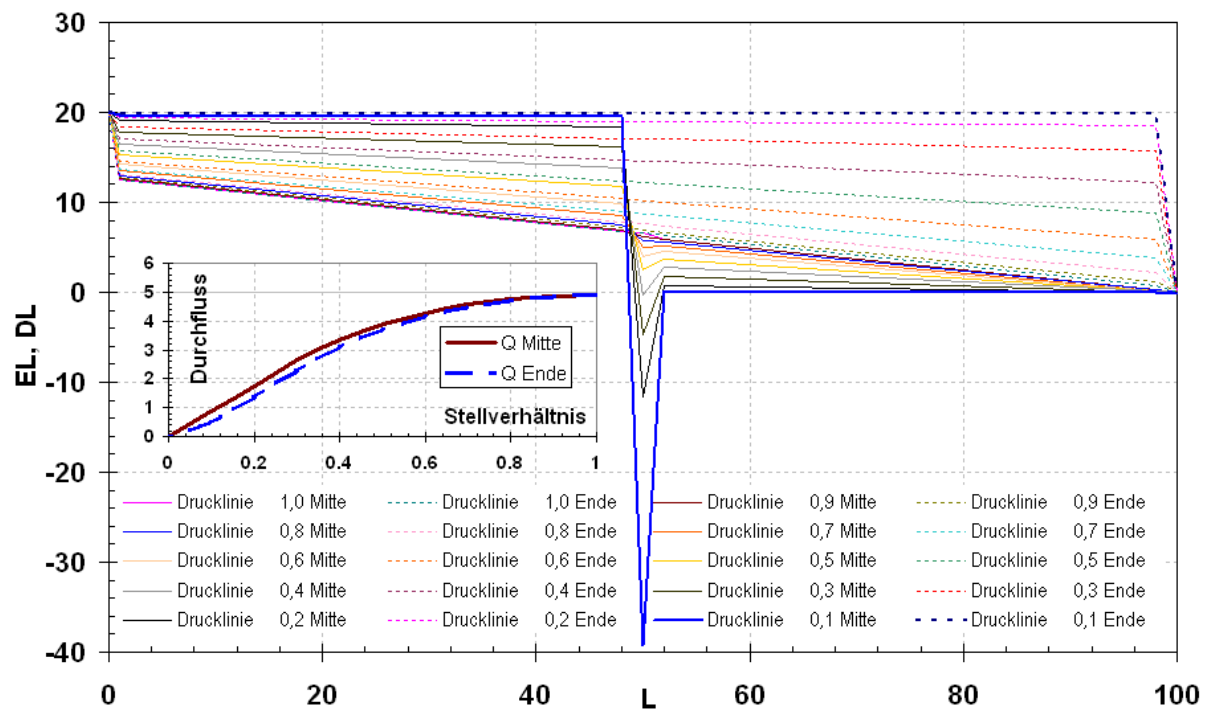


Bild 4

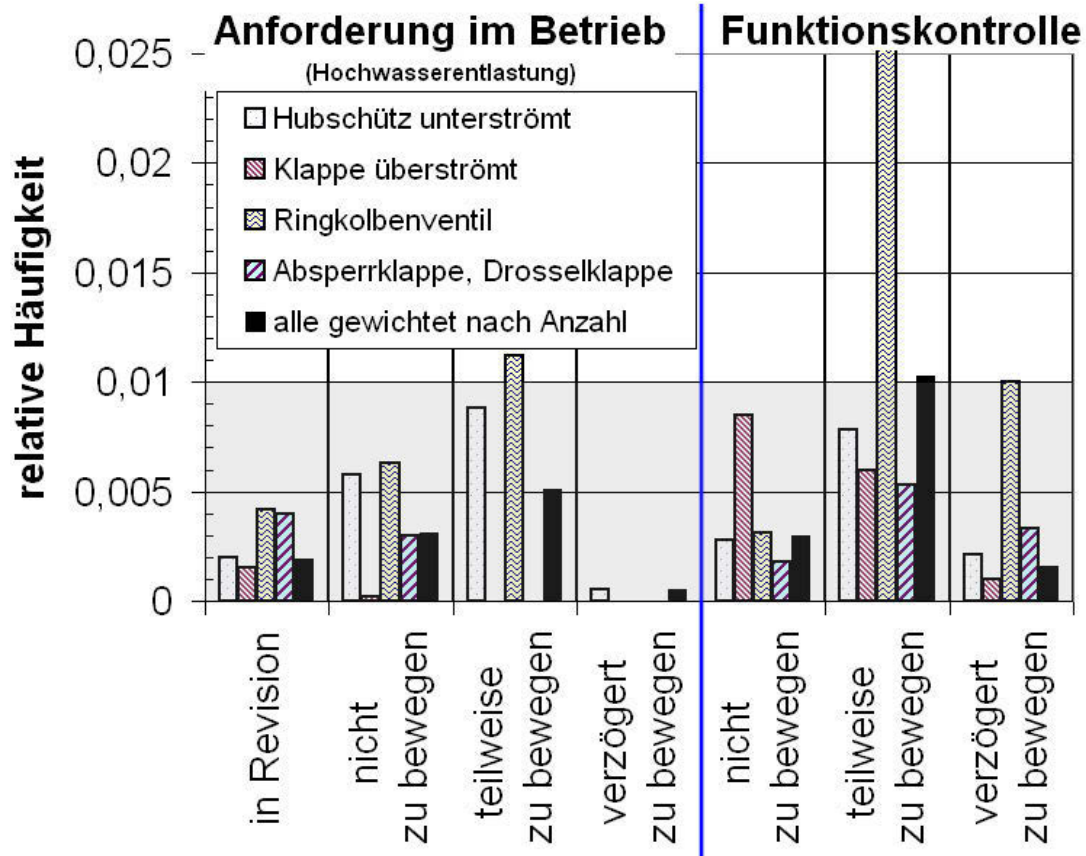


Bild 5

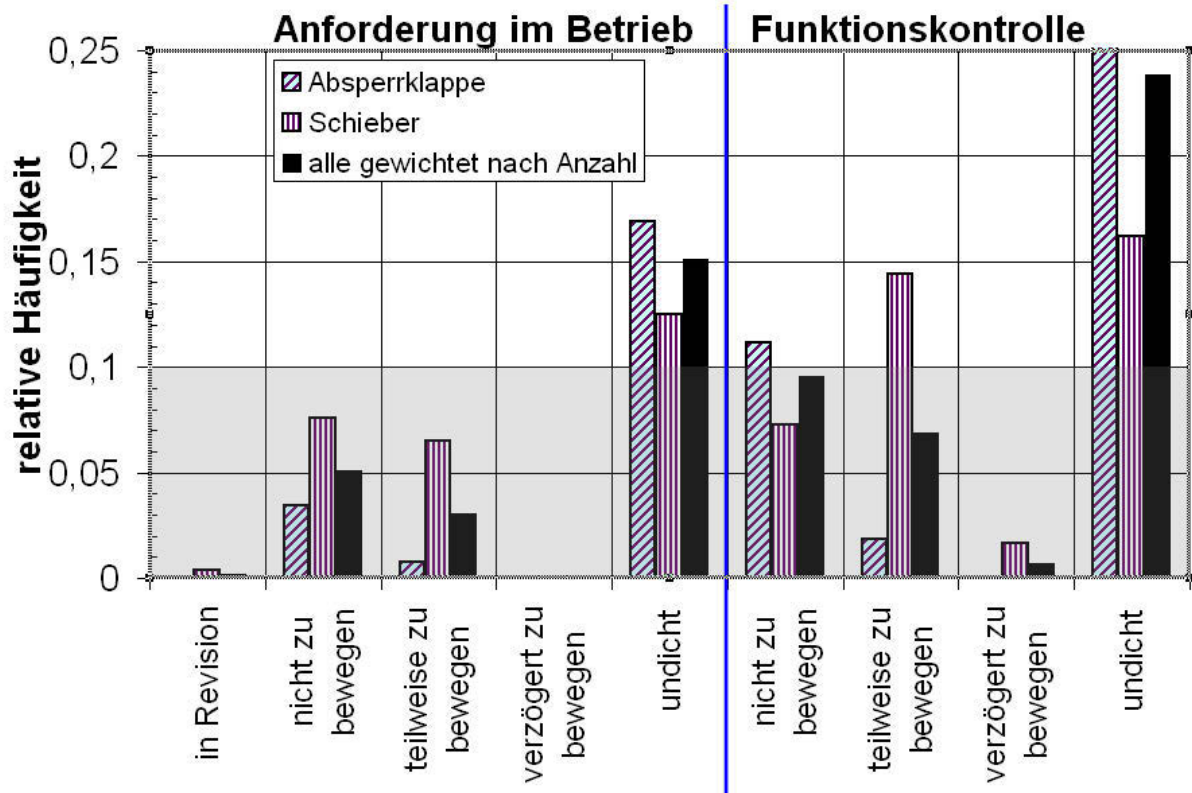


Bild 6